Application Note

揭秘使用 20 位 DAC 生成超低噪声、高保真波形的设计挑战

Anbu Mani *DAC*

摘要

本应用手册探讨了各种应用及其对高保真波形生成的要求。DAC11001B：20 位分辨率、高精度、超低噪声、低干扰以及出色的信号链 THD 性能进行了审查和展示。此外，竞争分析报告可帮助系统设计人员了解 DAC11001B 的性能优势。

内容

1 简介....2
2 关键应用....2
2.1 音频测试仪....2
2.2 高性能音频....2
2.3 自动测试设备 (ATE) 和任意波形生成 (AWG)....3
3 DAC11001B....3
4 性能测试结果....5
5 竞品分析 — 音频测试仪应用....7
6 总结....7
7 参考资料....7

插图清单

图 2-1. DAC11001B 目标终端应用....3
图 3-1. DAC11001B 信号链方框图及配套器件....4
图 4-1. 频谱 DAC11001B 与竞品 – 1kHz、10kSPS 更新速率、9Vpp....5
图 4-2. THD 性能....6
图 4-3. THD+N 性能....6

表格清单

表 4-1. 1kHz DAC 输出时的失真性能....5
表 4-2. 测试条件....5
表 5-1. DAC11001B EVM 与音频测试仪的比较....7

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

English Document: SLAAE55
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

1 简介

在提高精密 DAC 的精度和整体性能、同时提供更高的分辨率方面，已经取得了长足的进步。过去，精密 DAC 是以小于或等于 10MSPS 的速度运行的 DAC，注重高精度而非速度。由于这种重视，精密 DAC 受到分辨率的限制，只有在大约 16 位时才具有出色的线性度。

德州仪器 (TI) 继续投资于所有数模转换器 (DAC) 市场，并于近期发布了首款基于电阻梯的 20 位精密 DAC 即 DAC11001B。它在最高更新速率下具有最高精度、最低噪声及最低失真。

DAC11001B 兼具静态和动态性能，适用于众多应用。但是，本应用手册回顾了三种主要的应用，这些应用将从这款新型 DAC 出色的交流性能中受益。

此外，还展示了 DAC11001B 如何提高整体系统级性能。

2 关键应用

音频测试仪、高性能音频和自动测试设备适合高分辨率、精度和速度是关键规格的关键应用。

2.1 音频测试仪

音频测试仪需要生成涵盖音频范围（20Hz 至 20kHz）的高保真音调，并扩展至数百千赫兹。通常，测试激励是正弦音调，其纯度由总谐波失真 (THD) 和信噪比 (SNR) 定义。

音频测试系统采用高性能音频 DAC 或高精度 DAC 构建，以生成高保真纯正弦信号进行测试。这些 DAC 的分辨率范围为 16 至 20 位，具有低噪声和极低的干扰能量。

目前，设计人员使用 Δ-Σ DAC 拓扑生成音频信号，这些信号会产生带外噪声，需要额外的数字信号处理逻辑和噪声整形滤波器。额外的数字信号处理会增加原始信号中不存在的额外信息，以确保正确性。此外，它还会增加整体系统解决方案的尺寸和成本。

2.2 高性能音频

与具有 16 至 18 位分辨率的乘法 DAC 或 R-2R 梯形网络 DAC 相比，市场上性能非常高的音频应用都使用 Δ-Σ DAC 进行设计。

如前所述，Δ-Σ DAC 的优点是提高了音频 DAC 的动态性能，这受到 R-2R 设计可实现精度的限制。

然而，Δ-Σ 设计会因其被称为“带外噪声”的高频开关而在输出端引入噪声。此噪声通常超出可闻范围，但确实需要输出滤波。

DAC11001B 具有平坦的噪声密度，这意味着带外噪声远低于 Δ-Σ DAC。此外，其先进的跟踪保持功能可导致与输入代码无关的低输出干扰。

这项新技术使设计人员能够挑战精密 DAC 在高保真音频应用中不足的假设。

English Document: SLAAE55
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

2.3 自动测试设备 (ATE) 和任意波形生成 (AWG)

半导体 ATE 专门设计用于测试各种电子器件（如二极管，FET）和集成电路（如线性及混合信号器件）。通过向被测器件 (DUT) 发送激励信号并且捕获来自 DUT 的响应来执行测试。根据要执行的测试，激励可以是静态的，也可以是动态的。

大多数这些测试仪都要求其驱动器电路能够生成分辨率为 16、18 或 20 位的激励信号，低于 1ppm 的直流精度水平，宽带宽超低噪声以及快速更新速率，以测试当今先进的器件。

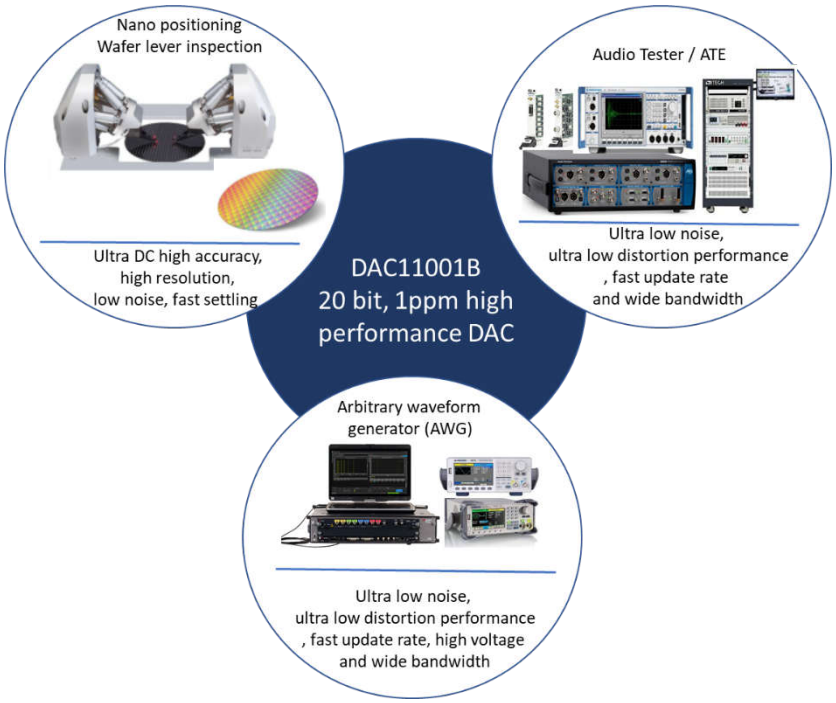


图 2-1. DAC11001B 目标终端应用

3 DAC11001B

DAC11001B 具有 20 位分辨率、高精度 INL、DNL（1ppm 最大值）、超低噪声性能 (7nV/√Hz) 以及快速稳定时间 (1μs)，以及可实现极低干扰 (1nV-s) 的片上增强型抗尖峰脉冲电路，这有助于在 THD 为 –120dB 时生成 1kHz 超低失真波形。DAC11001B 器件包含上电复位 (POR) 电路，因此 DAC 上电时使用寄存器中的已知值。通过外部基准，可以实现从正基准 (VREFPF) 到负基准 (VREFNF) 的 DAC 输出范围，包括非对称输出范围。DAC11001B 使用一个以高达 50MHz 的时钟速率运行的多功能 4 线制串行接口。

系统设计需要特别注意选择配套器件（有源和无源器件），以便在现实中实现 DAC11001B 所保证的 20 位超低噪声失真性能。热效应会严重影响系统性能，因此必须使用具有低温系数的元件，并且所有固有元件误差和信号链产生的误差必须很低或与 DAC 产生的误差相当。

有关误差源和计算的更多详细信息，请参阅*非缓冲 R2R DAC 的误差计算 – 使用 DAC11001A 的示例*。

此外，PCB 布局在减少系统中的误差方面也发挥着至关重要的作用。设计中的模拟和数字元件必须进行隔离，将模拟电路放置在远离开关电源和数字通信线路等高频元件的位置。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

图 3-1 显示了典型的信号链，其中包含推荐器件，可实现出色的交流性能。

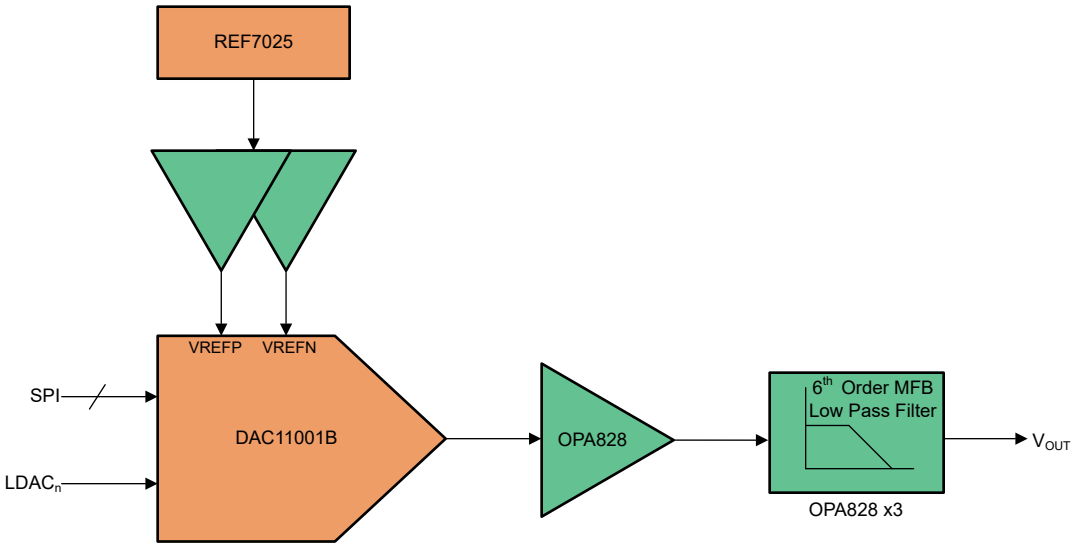


图 3-1. DAC11001B 信号链方框图及配套器件

DAC11001B 提供非缓冲电压输出，为客户根据系统性能灵活选择外部缓冲器提供了灵活性。

在该电路中，OPA828（JFET 运算放大器）用作 DAC11001B 的输出端的缓冲器。OPA828 低失调电压 (50 μV) 和低噪声（典型值 4nV/√Hz），这在高达 100kHz 的频段内是平坦的。凭借各种交流特性，包括 45MHz 增益带宽积 (GBW)、150V/μs 的压摆率和精密直流特性，OPA828 非常适合用于波形生成应用。OPA828 还用于构建有源滤波器，以去除更高阶的谐波含量。

OPA827 用作基准缓冲器来驱动 DAC11001B 的非缓冲基准输入。该器件的出色直流性能提供了非常低的噪声（1 kHz 时为 4nV）、非常低的漂移（典型值为 0.5μV/°C）和低偏置电流（典型值 3pA）。此外，该器件支持 ±4V 至 ±18V 的宽电源电压范围，从而支持 DAC11001B 的宽输入基准要求（高达 ±15V）。

信号链使用 REF7025 作为基准源，具有高精度、低噪声和超低温度漂移系数 (2ppm/°C) 以及高精度 (±0.025%)。

English Document: SLAAE55
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

4 性能测试结果

本文档将 DAC11001B 的性能数据与市场上类似器件的数据进行了比较。总谐波失真 (THD) 和总谐波失真加噪声 (THD+N) 可评估高保真音频。APx555B 高性能音频分析仪可测量信号链性能。

表 4-1 和图 4-1 比较了 DAC11001B 和竞品器件在生成 1kHz 正弦音调、更新速率为 10kSPS、振幅为 9Vpp 时的频谱性能。

DAC11001B 信号链提供 -115dB THD 和 -105dB THD+N 性能，与竞争对手的性能相比，失真几乎改善了 20dB。

表 4-1. 1kHz DAC 输出时的失真性能

器件	频率	THD	THD+N
DAC11001B	1kHz	-115dB	-105dB
竞品	1kHz	-96dB	-95dB

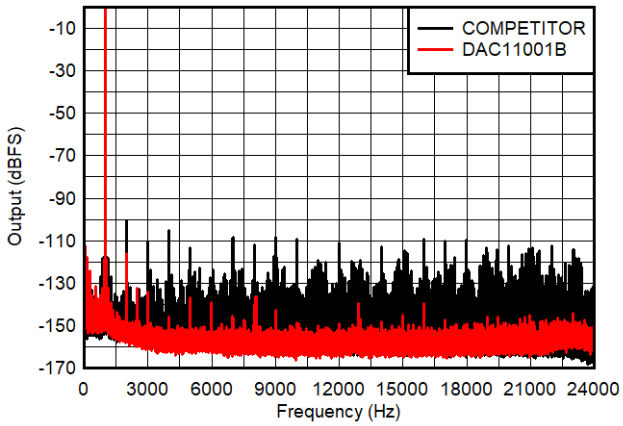


图 4-1. 频谱 DAC11001B 与竞品 – 1kHz、10kSPS 更新速率、9Vpp

表 4-2. 测试条件

参数	值
图形	正弦
输出电压	9 Vp-p
DAC 输出信号频率	1kHz 至 20kHz
DAC 更新速率	768kSPS
SPI、SCLK 频率	38.4MHz
基准电压	±4.5V

English Document: SLAAE55
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

图 4-2 和图 4-3 展示了 DAC11001B 和竞品器件在不同频率（1kHz 至 20kHz）下、768kSPS 更新速率时的 THD 和 THD+N 性能。

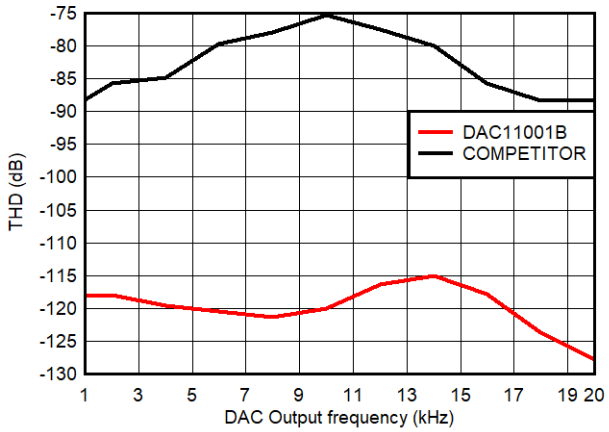


图 4-2. THD 性能

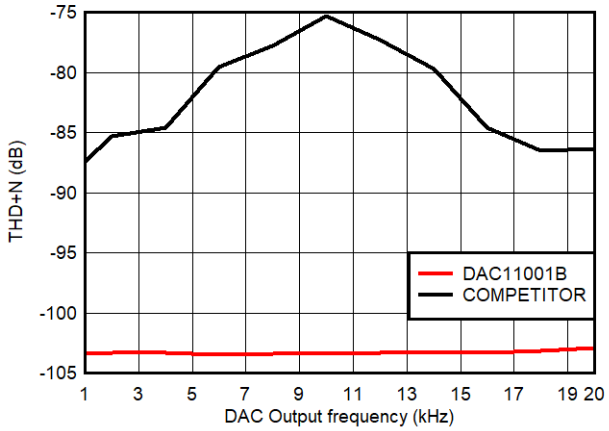


图 4-3. THD+N 性能

English Document: SLAAE55
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

5 竞品分析 — 音频测试仪应用

表 5-1 比较了 DAC11001B 与市场上几款音频测试仪的性能。结果表明，DAC11001B 的 THD 性能优于市场上现有的竞品和其他设备，与 Keysight U8900B 的 THD+N 性能相当。

表 5-1. DAC11001B EVM 与音频测试仪的比较

终端设备	THD	THD+N
DAC11001B EVM	-120	-106
竞品 EVM	-88	-87
KEYSIGHT，U8903B 高性能音频频谱分析仪	-116	-110
NI，NI4461 声音和振动模块	-97	-97
R&S，UPP 音频分析仪	-	-100

6 总结

总之，本应用手册鼓励电路设计人员和系统开发人员了解 DAC11001B 的真实交流性能，以及如何为高性能音频测试仪、高性能音频、任意波形发生器和自动测试设备等测试和测量应用构建超低噪声、超低失真和高保真波形生成。

竞品的分析有助于设计人员考虑 TI 的 DAC11001B 是业界出色的 20 位高精度 DAC，可用于其系统，满足当前和未来的应用需求。

7 参考资料

- 德州仪器 (TI)：*非缓冲 R2R DAC 的误差计算 – 使用 DAC11001A 的示例*
- TI 高精度实验室 — 关键交流和直流规格培训

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做出任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、与某特定用途的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保法规或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 TI 销售条款)、TI 通用质量指南 或 ti.com 上其他适用条款或 TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。 除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月